آموزشی

انرژی و شاگرد حیران II: دستگاه‌ها

جان دابلیو. جوت جوینور
دانشگاه پلی تکنیک ایالات کالیفرنیا، پومونا، کالیفرنیا

ترجمهٔ
مرضیه هرمزی‌نژاد
(مربی زبان کانون زبان ایران)
دستان هرمزی‌نژاد
dh.phys.ir@hotmail.com
(دبیر فیزیک، استان اصفهان، شهرستان برخوار، کارشناس ارشد فیزیک اتمی و مولکولی)

مقدمه

انرژی مفهومی کلیدی و اساسی در حل مسائل فیزیک است، اما در عین حال اگر این مفهوم را معلم یا کتاب‌های درسی به درستی ارائه نکنند، باعث سردرگمی شاگردان خواهد شد. اولین مقاله۱ از این رشته مقاله‌ها در مورد سردرگمی شاگرد در نتیجهٔ برخورد سنتی با کار بحث کرد. در هر بحثی دربارهٔ کار، مهم است بیان کنیم که کار را نیرو روی یک دستگاه انجام می‌دهد. این عبارت دو جزء مهم دارد: (۱) شناسایی نیرویی که کار را انجام می‌دهد. (۲) شناسایی دریافت‌کنندهٔ کار به عنوان یک دستگاه.

تعداد معدودی از کتاب‌های درسی یا سخنرانی‌ها از رهیافت‌های دستگاه ـ محور در مسئلهٔ انرژی استفاده می‌کنند.

دو گام آغازین در استفاده از رهیافت انرژی شامل موارد زیر است:

۱. شناسایی دستگاه

۲. طبقه‌بندی کردن دستگاه

شناسایی دستگاه

یک دستگاه می‌تواند هر یک از موارد زیر باشد:

- یک جسم منفرد
- دو جسم برهم‌کنش‌کننده
- مجموعه‌ای از چندین جسم برهم‌کنش‌کننده
- جسمی تغییر شکل‌پذیر، مانند تویی لاستیکی یا نمونه‌ای از مولکول‌های گاز
- جسمی چرخان، مثل چرخ
- ناحیه‌ای از فضای احتمالاً تغییرشکل‌پذیر، مانند حجم سیلندر موتور اتومبیل در بالای پیستون.

کلیدواژه‌ها: **کار داخلی، کار خارجی، پایستگی انرژی، انرژی پتانسیل گرانشی، انتقال انرژی، قضیهٔ کار ـ انرژی**

در بخش اولیهٔ مطالعهٔ انرژی در یک دورهٔ فیزیک مقدماتی نوعی، اغلب دستگاه موردنظر فقط یک جسم است. اما در روش دستگاه ـ محور برای تدریس انرژی، حتی در مباحث اولیه برای آماده‌کردن شاگردان برای وضعیت‌های پیچیده‌تر که به زودی معرفی می‌شوند ـ مفهوم دستگاه، مورد تأکید قرار می‌گیرد.

برای هر چیزی که از دستگاه گرفته شود، یک مرز بسته وجود دارد که دستگاه را دربرمی‌گیرد و آن‌را از هر چیز خارج آن که محیط یا فضای اطراف است. جدا می‌سازد. شاید مرز دستگاه بر همان سطح فیزیکی، مثل سطح خارجی توپ بیس‌بال، منطبق باشد، اما این انطباق ضروری نیست.

به عنوان مثال نسبتاً سادهٔ جسمی را در نظر بگیرید که روی سطحی دارای اصطکاک با نیروی F موازی با سطح کشیده می‌شود. فرض کنید که از شاگرد خواسته شود در حالی‌که جسم با سرعت ثابت کشیده می‌شود، این وضعیت را برحسب انرژی تجزیه و تحلیل کند. در روش سنتی که دستگاه محور نیست شاگرد تمایل به تمرکز روی جسم دارد، چون جسم تنها دریافت‌کنندهٔ کار است که درباره‌اش بحث می‌شود.

شاگرد به احتمال زیاد قضیهٔ کار ـ انرژی، $W=\Delta K$، را به‌کار می‌گیرد. چون این قضیه تنها اصل انرژی است که دربارهٔ آن صحبت شده است. این رهیافت چهار عیب اساسی دارد:

اولاً همان‌طور که در مقالهٔ اول این سلسله مقاله‌ها بحث شد، کاری که نیروی اصطکاک روی جسم انجام می‌دهد را نمی‌توان محاسبه کرد، چرا که جابه‌جایی جسم مانند

جابه‌جایی تعداد زیادی از نقطه‌هایی که نیروی اصطکاک بر آن وارد شده نیست. ثانیاً، تغییر ΔK در انرژی جنبشی صفر است، زیرا جسم با اندازه سرعت ثابت کشیده می‌شود. ثالثاً، احتمال انتقال انرژی بین جسم و سطح به وسیلهٔ گرما را نمی‌توان محاسبه کرد و در قضیهٔ کار ـ انرژی هم لحاظ نمی‌شود. سرانجام، قضیهٔ کار ـ انرژی حاوی جملهٔ خاصی برای انرژی داخلی نیست، که جزء مهمی در ذخیره‌سازی انرژی در این مسئله است.

در مقایسه با آن، شاگردی که با رهیافت دستگاه ـ محور به مسائل مربوط به انرژی و همچنین با سرشت کلی انرژی آشنایی دارد متوجه این مشکلات می‌شود و می‌داند که بهتر است دستگاه را جسم، و سطح با مرز دستگاه شامل جسم و سطح در نظر بگیرد، و نه عامل واردکنندهٔ نیروی F. (به خاطر امکان مبادلهٔ انرژی به‌وسیلهٔ گرما از سطح به بدنهٔ جسم شامل مرز، مرز دستگاه باید فقط شامل تمام جسم باشد، نه فقط سطح دو ـ بعدی، با ضخامت خود.) در این مورد تنها انتقال انرژی به دستگاه، کاری است که نیروی F روی دستگاه انجام می‌دهد، و تنها تغییر انرژی دستگاه، تغییر انرژی داخلی به علت اصطکاک است:

$$W_F = \Delta E_{int} \qquad (1)$$

در واقع، بین جسم و سطح، مبادلهٔ انرژی توسط گرما صورت می‌گیرد، اما این مبادله **در داخل** دستگاه است. بدون اطلاعات بیشتر، هیچ راهی برای پی‌بردن به تغییرات جداگانه انرژی داخلی جسم و سطح وجود ندارد. معادلهٔ بالا تمام آنچه را که لازم است دربارهٔ این وضعیت بدانیم بدون این اطلاعات بیان می‌کند.

طبقه‌بندی کردن دستگاه

پس از این‌که دستگاه شناسایی شد، مهم است مشخص کنیم آیا دستگاه **منزوی است** یا **غیرمنزوی**. دستگاه منزوی دستگاهی است که در آن هیچ‌گونه انتقال انرژی از مرز دستگاه صورت نگیرد. دستگاه غیرمنزوی دستگاهی است که در آن انتقال انرژی از مرز توسط یک سازوکار یا بیشتر صورت گیرد.

در مورد کشیدن جسم روی سطح که قبلاً درباره‌اش بحث شد، فرض کنید جسم را به عنوان دستگاه شناسایی کنیم. این دستگاه به روشنی غیرمنزوی است، زیرا به واسطهٔ کار انجام شده به‌وسیلهٔ نیروی وارد بر دستگاه گرما و انرژی از مرز عبور می‌کند. اصطکاک باعث گرم شدن جسم

می‌شود، بنابراین هنگامی که جسم حرکت کند، انرژی از جسم گرم به هوا و همچنین به بخش‌های سردتر جریان می‌یابد. حالت پیچیده‌تر انتقال انرژی توسط امواج مکانیکی ـ صوت ـ است، مثل وقتی‌که جسم روی سطح ناصافی کشیده می‌شود. اگر جسم و سطح را به عنوان دستگاه در نظر بگیریم، این دستگاه هنوز غیرمنزوی است. کاری که نیروی وارد روی دستگاه انجام می‌دهد و انتقال انرژی به هوا توسط گرما و صدا انجام می‌شود. برای شناسایی دستگاه منزوی در این حالت باید هوا و عامل واردکنندهٔ نیروی F را هم منظور کنیم به‌طوری‌که کار، گرما و صدا، انتقال‌های انرژی در داخل دستگاه را نشان دهند و نه از مرز دستگاه.

به‌طور کلی وضعیت‌های فیزیکی که در آن‌ها انتقال انرژی توسط گرما، صوت و نور دخیل باشند پیچیده‌اند، زیرا انرژی در این فرایندها تا فاصله‌های دور منتشر می‌شود. در بسیاری موارد این انتقال‌ها، به منظور استفاده از تقریبی مناسب دستگاهی با اندازهٔ منطقی نادیده گرفته می‌شوند. به عنوان مثال برای جسم افتان معمولاً مقاومت هوا نادیده گرفته می‌شود، به‌طوری‌که گرم‌شدن جسم به‌خاطر نیروی کشش و انتقال انرژی توسط گرما بین جسم و هوا نادیده گرفته می‌شود. در این مورد اگر فقط جسم را به عنوان دستگاه مشخص کنیم، به‌خاطر کاری که نیروی گرانشی

روی دستگاه انجام می‌دهد، دستگاه غیرمنزوی خواهد بود. اگر مجموعهٔ جسم و کرهٔ زمین را دستگاه بگیریم، دستگاه منزوی می‌شود. چرا که هیچ انتقال انرژی از مرز این دستگاه وجود ندارد.

وقتی دستگاه مشخص و طبقه‌بندی شد، اصل پایستگی انرژی در مورد آن به‌کار می‌رود. همین اصل نیز برای دستگاه‌های منزوی و غیرمنزوی به‌کار می‌رود. این فرایند در مقالهٔ چهارم این سلسله مقاله‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت.

کار داخلی و خارجی

به عنوان مثال دیگری که اهمیت تعیین دستگاه را نشان می‌دهد، نگاهی به گزارهٔ دربارهٔ انرژی پتانسیل بیندازید که در کتاب‌های درسی متداول است.

وقتی یک نیروی پایستار کار W را انجام دهد، انرژی پتانسیل متناظر با نیرو طبق رابطهٔ زیر تغییر می‌کند:

$$W = -\Delta U \qquad (۲)$$

این گزاره به دستگاه و این‌که آن نیروی پایستار داخلی است یا خارجی، یا این‌که کار روی دستگاه انجام می‌شود یا در داخل دستگاه، هیچ اشاره‌ای ندارد. شاگرد باهوش متوجهٔ تناقض می‌شود: «اگر من کتاب را به قفسه‌ای بالاتر ببرم، روی دستگاه کتاب ـ زمین کار مثبت انجام می‌دهم و انرژی پتانسیل گرانشی دستگاه **افزایش** می‌یابد، نه **کاهش**.» برای این حالت می‌توان نوشت:

$$W = \Delta U \qquad (۳)$$

که U انرژی پتانسیل گرانشی دستگاه کتاب ـ زمین را نشان می‌دهد.

شاگردی که به معادله‌های (۲) و (۳) می‌نگرد، به احتمال زیاد دربارهٔ علامت منفی که در یک معادله وجود دارد و در دیگری وجود ندارد حیران می‌شود. در این مورد باید با شاگردان بحث کرد که کارهای انجام شده در طرف چپ این معادله‌ها یکسان نیستند. در معادلهٔ (۳) کار W کاری است که محیط **روی** دستگاه انجام می‌دهد و نشان‌دهندهٔ عبور انرژی از مرز دستگاه است. بنابراین می‌توانیم این کار را کار **خارجی** در نظر بگیریم چون نشان‌دهندهٔ تأثیری از خارج بر دستگاه است.

در معادلهٔ (۲) کار W کاری است که به‌صورت داخلی توسط عضوی از دستگاه بر عضو دیگر انجام گرفته است. در مورد کتاب افتان که با معادلهٔ (۲) توصیف شد W کاری است که نیروی گرانشی وارد بر کتاب از طریق زمین روی کتاب انجام می‌دهد که برای دستگاه کتاب ـ زمین داخلی است. به شدت توصیه شده است که برای کارهای انجام شده در معادله‌های (۲) و (۳) از نمادهای مختلف استفاده کنید تا بر تفاوت بین آن‌ها تأکید شود.

معادلهٔ (۳) در مقایسه با معادلهٔ (۲) در موارد معدودی ظاهر می‌شود. اما معادلهٔ (۳) به‌خاطر آن‌که شبیه قضیهٔ کار- انرژی جنبشی، ($W=\Delta k$)، است اهمیت دارد. در قضیهٔ کار- انرژی جنبشی، انرژی توسط کار به داخل دستگاه منتقل می‌شود و نتیجهٔ آن افزایش انرژی جنبشی دستگاه است. معادلهٔ (۳) حالت مشابهی را نشان می‌دهد که انرژی بر اثر کار به داخل دستگاه منتقل می‌شود و نتیجهٔ آن افزایش انرژی پتانسیل دستگاه است.

وقتی نیروهای پایستار را به انرژی پتانسیل ربط می‌دهیم، مهم است خاطرنشان کنیم نیروی پایستار بین اجزای دستگاه اعمال می‌شود و کار در داخل دستگاه انجام می‌گیرد. گزارهٔ کامل و بهتر از آن‌چه در مورد معادلهٔ(۲) در بالا گفته شد به قرار زیر است:

دستگاهی را در نظر بگیرید که در آن یک نیروی پایستار بین اجزای دستگاه اعمال می‌شود. اگر یک جزء دستگاه حرکت کند به‌طوری که نقطهٔ اعمال نیروی پایستار جابه‌جا شود و نیرو کار Wc را در داخل دستگاه انجام دهد، انرژی پتانسیل در دستگاه مطابق رابطهٔ زیر تغییر می‌کند:

$$W_c = -\Delta U \qquad (۴)$$

باروِ[۵] اظهار می‌دارد که واژهٔ کار را می‌توان تکیه‌گاهی دانست که راه را برای معرفی بعدی انرژی پتانسیل هموار می‌کند. در تمام مسائل مکانیکی بعدی دیگر به کار توجهی نمی‌شود و انرژی‌های جنبشی و پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.» به نظر می‌رسد که این گزاره کار داخلی و خارجی با هم اشتباه می‌کند. در حالی‌که کار داخلی درون دستگاه در واقع مربوط به تغییر در انرژی پتانسیل دستگاه است، کار خارجی می‌تواند مربوط به تغییر هر نوع انرژی در دستگاه باشد. جنبشی (قضیهٔ کار- انرژی جنبشی)، پتانسیل (بردن کتاب به قفسهٔ بالاتر) یا داخلی (مالیدن دست‌هایتان به‌هم).

بنابراین در رهیافت دستگاه محور به انرژی بی‌شک کار

کنار گذاشته نمی‌شود. بلکه تفاوت مهمی بین کار داخلی و کار خارجی بر روی دستگاه گذاشته می‌شود.

دستگاه‌های چندگانه

شـاید یک مسـئله معین شامل دسـتگاه‌های مختلف برای بخش‌های متفاوت باشـد. برای مثـال آزمایش آونگ بالیسـتیک تفنگ ـ فنری را در نظر بگیرید که در بسیاری از آزمایشـگاه‌های مقدماتی انجام می‌شود؛ تجزیه و تحلیل این وسیله شامل سه دستگاه می‌شود. اولین دستگاه شامل فنر و پرتابه‌ای است که از تفنگ فنری پرتاب می‌گردد. این دسـتگاه منزوی می‌تواند برای مرتبط ساختن اندازه سرعت پرتابه به فشردگی فنر توسط پایستگی انرژی مکانیکی مورد اسـتفاده قرار گیرد. دستگاه دوم پرتابه و بازوی آونگ است. پایستگی تکانه در این دستگاه منزوی به‌کار می‌رود تا اندازهٔ سـرعت اولیهٔ پرتابه و اندازه و سرعت نهایی ترکیب پرتابه و بازوی آونگ را به هم مربوط کند. سرانجام، پایستگی انرژی مکانیکی برای دسـتگاه منزوی پرتابه، بازوی آونگ و زمین به‌کار می‌رود تا اندازه سـرعت نهایی ترکیب بازوی پرتابه را به ارتفاع نهایی مرکز جرم این ترکیب مربوط سازد.

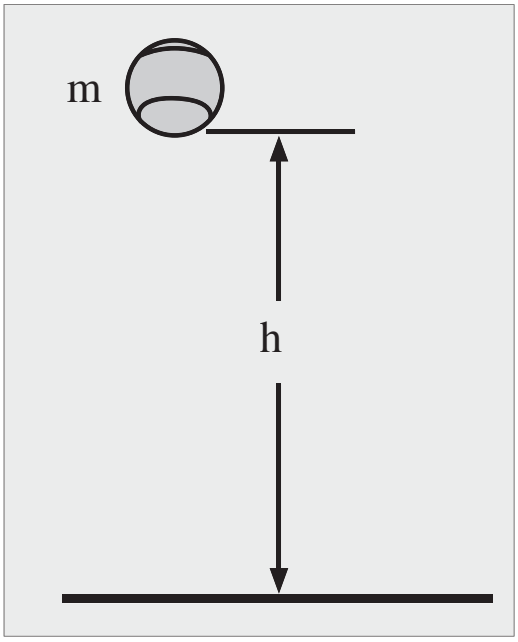
کیپُرتـس دربارهٔ وضعیـت بادکنک پـر از هلیم بحث می‌کند، و اظهـار می‌دارد که شـاگردانش از کاهش انرژی پتانسـیل و با بالا رفتن بادکنک در هوا شگفت‌زده می‌شوند. در این بحث واژهٔ *دستگاه* هرگز مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و انرژی پتانسـیل با عنوان انرژی جنبشی «بادکنک» در نظر گرفته می‌شود. در واقع معادلهٔ (۶)، $U=(mg-pVg)y$ او بنا به فرض انرژی پتانسیل بادکنک را به صورت ترکیبی از آنچه مربوط به نیروی گرانشی و آن‌چه مربوط به نیروی شناوری اسـت درنظر می‌گیرد. معادله دو دستگاه مختلف را در هم می‌آمیزد. انرژی پتانسـیل مربوط به نیروی گرانشی مربوط به دستگاه بادکنک و کرهٔ زمین است. انرژی پتانسیل مربوط به نیروی شـناوری مربوط به دسـتگاه بادکنک و هواست. اگـر در این بحث قرار بود دسـتگاه به صورت بادکنک، کرهٔ زمین و هوا تعریف شود، شاید معادله به‌گونه‌ای توجیه شود، اما برای این دسـتگاه نیـروی خالص بین بادکنک و ترکیب کرهٔ زمین- هوا نیروی دافعه اسـت. دسـتگاه را می‌توان به صورت یک دسـتگاه منزوی مدل‌سـازی کرد که در آن دو مؤلفـه وجـود دارد که یکدیگـر را دفع می‌کننـد. بنابراین کاهش انرژی پتانسیل دستگاه با بالا رفتن بادکنک بیشتر از کاهش انرژی پتانسـیل در دستگاه دو پروتونی که به خاطر وجود نیروی دافعه از هم دور می‌شـوند تعجب‌آور نیسـت.

به‌جای معرفی این مثال به عنوان یک موضوع شـگفت‌انگیز بهتر است که از این فرصت برای مدل‌سازی و مطرح کردن بحث بالا اسـتفاده کرد تا بتوان شباهت دو دستگاه مختلف (پروتون- پروتـون؛ یا ترکیب زمین- هوا و بادکنک) که هر دو را می‌تـوان به عنوان زوج اجسـامی کـه یکدیگر را دفع می‌کنند مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

مسئله‌ها

دو مسئله زیر را در نظر بگیرید.

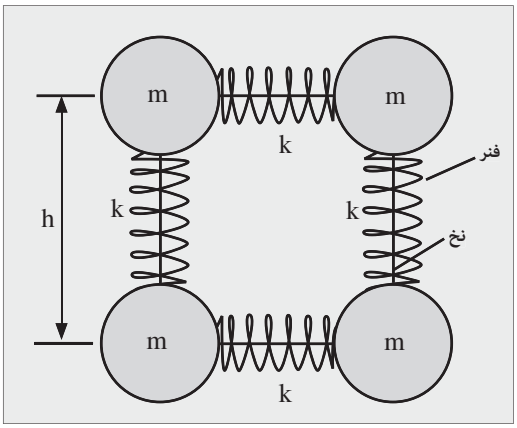
۱) توپی به جرم m از ارتفاع h بالاتر از سطح زمین رها می‌شود (شکل ۱). و مقاومت هوا نادیده گرفته می‌شود. توپ با چه اندازه سرعتی به زمین برخورد می‌کند؟



شکل ۱. توپی به جرم m از ارتفاع h بالاتر از سطح زمین رها می‌شود. توپ با چه اندازه سرعتی به زمین برخورد می‌کند؟

۲) هر یک از چهار کرهٔ کوچک دارای جرم m هسـتند. بین هر جفت کره فنر متراکمی وجود دارد که با فنرها یک مربع به ضلع h تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

فنرها یکسـان با جرم ناچیـز دارای طول‌های آزاد L و ثابت نیروی k هسـتند و به کره‌ها متصل نیستند. کره‌ها با نخ‌های سـبک به هم بسته شـده‌اند که از میان محورهای چهـار فنر می‌گذرند. دسـتگاه در ناحیه بدون گرانی از فضا قرار دارد. چهار نخ همزمان طوری بریده می‌شوند که فنرها کره‌هـا را از هم دور کند. هنگامی کـه کره‌ها دیگر با فنرها در تماس نیستند با چه اندازه سرعتی از هم دور می‌شوند؟



شکل ۲. چهار کره به جرم m در مربعی به ضلع h با فنر به هم متصل شده‌اند. فنرهای یکسان بین هر جفت کره فشرده شده‌اند. وقتی نخ‌ها قطع می‌شوند کره‌ها از هم دور می‌شوند. وقتی تماس کره‌ها با فنرها قطع شود با چه اندازه سرعتی از هم دور می‌شوند؟

آیا این مسائل اساساً متفاوتند؟ شاید شاگردی که با رهیافت دستگاه ـ محور آشنا نیست بتواند با استفاده روش‌های ساده اما نامناسب «mgh را مساوی $\frac{1}{2}mv^2$ بگذارید؟» مسئله اول را حل کند اما در مسئلهٔ دوم گیر می‌کند. مسئلهٔ دوم شامل انرژی‌های جنبشی چندگانه و انرژی‌های پتانسیل چندگانه است و حل مسئله نیاز به آشنایی با انرژی یک دستگاه دارد، نه صرفاً آشنایی با انرژی یک جسم واحد.

شاگردی که رهیافت دستگاه ـ محور را یاد گرفته باشد، گام‌های آغازین مشابهی را برای هر دو مسئله برمی‌دارد. در مسئله۱ دستگاه را توپ و کرهٔ زمین در نظر می‌گیریم. این دستگاهی منزوی است که در آن هیچ نیروی ناپایستاری اعمال نمی‌شود. بنابراین فقط معادله‌ای برای پایستگی انرژی مکانیکی می‌نویسیم:

$$\Delta K + \Delta U_g = 0, \qquad (۵)$$

که در آن U_g انرژی پتانسیل گرانشی است.

برای مسئله۲ دستگاه را چهار کره و چهار فنر در نظر می‌گیریم. این هم یک دستگاه منزوی است که در آن هیچ نیروی ناپایستاری اعمال نمی‌شود، بنابراین معادله‌ای برای پایستگی انرژی مکانیکی می‌نویسیم:

$$\Delta K + \Delta U_s = 0, \qquad (۶)$$

که در اینجا U_s انرژی پتانسیل فنر (کشسانی) است. رهیافت‌ها در هر دو مسئله مشابه‌اند اما ارزیابی‌های انرژی متفاوتند. این مسئله‌ها در چهارمین مقالهٔ این مجموعه به‌طور کامل حل خواهند شد.

به کمک بحث‌های بالا پرسش‌های درست یا غلط زیر را در نظر بگیرید که مربوط به بحث قبلی حرکت قطعه روی یک سطح است. **درست یا غلط؟** جسمی با اندازه سرعت ثابت توسط یک نیروی موازی با سطح روی میز کشیده می‌شود. چون جسم در تعادل است نیروی اصطکاک از نظر اندازه با نیروی اعمال شده مساوی است. بنابراین کاری که نیروی اصطکاک روی جسم انجام می‌دهد از نظر اندازه با کار نیروی اعمال شده مساوی است. کار خالصی که تمام نیروها روی جسم انجام می‌دهند صفر است.

این استدلال برای بسیاری از شاگردان فریبنده است اما همان طور که شرود و برنارد و چی بی شروود بررسی کرده‌اند، این بحث نادرست است. این بحث از دو دیدگاه می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. اولین دیدگاه مربوط به تعریف کار است که در مقالهٔ اول این مجموعه مورد بحث قرار گرفت. گرچه نیروی اعمال شده و نیروی اصطکاک دارای اندازه‌های مساوی هستند، اما جابه‌جایی نیروی اعمال شده با جابه‌جایی‌های بسیار نیروی اصطکاک در تعداد زیادی از نقطه‌های تماس یکسان نیست. بنابراین کاری که دو نیرو انجام می‌دهند از لحاظ اندازه یکسان نیستند و یکدیگر را حذف نمی‌کنند.

دومین دیدگاه دید مربوط به تحلیل دقیق دستگاهی انرژی است. اجازه دهید جسم را دستگاه در نظر بگیریم. اگر ما ادعا کنیم که کار خالص انجام شده روی جسم توسط همهٔ نیروها صفر است و هیچ انتقال انرژی درون دستگاه وجود ندارد، پس انرژی دستگاه باید ثابت باقی بماند. زیرا جسم با اندازه سرعت ثابت حرکت می‌کند. اما به تجربه می‌دانیم که کشش جسم روی سطح باعث گرم‌تر شدن جسم می‌شود- یعنی انرژی داخلی آن افزایش می‌یابد. اگر کار انجام شده روی دستگاه صفر بود، هیچ منبعی برای این افزایش انرژی داخلی وجود نداشت.

نتیجه‌گیری

چند مورد را در اینجا ارائه دادیم که در آن‌ها مشخص کردن دستگاه مربوطه وقتی مسئله‌ای با رهیافت انرژی مطرح می‌شود، مهم است. انجام ندادن این کار می‌تواند به خطاها و بدفهمی‌هایی بینجامد به عنوان معلم فیزیک وظیفه داریم که شاگردان خود را به اهمیت شناسایی و طبقه‌بندی کردن دستگاهی در هنگام استفاده از رهیافت انرژی برای حل مسئله متقاعد کنیم. در بخش‌های بعدی این مجموعه [مقاله]ها سردرگمی حاصل از استفادهٔ نادقیق از زبان در بحث انرژی مورد بررسی قرار خواهیم داد.

منبع

THE PHYSICS TEACHER VOL. 46 February 2008 81-86.